УДК (519.718:621.396)535

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ФОКУСИРОВКИ НА ОЦЕНКУ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

С.М. Слободян

Инновационный центр "ТЕСТ", г. Томск
E-mail: IC_Test@ inbox.ru

Установлена взаимосвязь между фрактальной размерностью и деградацией (размытием и дефокусировкой) пространства изображения в области выходной плоскости оптической системы. Использование дифференциального способа контроля положения плоскости оптимальной фокусировки позволило исключить влияние непостоянства освещенности изображения на оценку фрактальной размерности. Обнаружена квадратичная зависимость фрактальной размерности от дефокусировки. Предложены алгоритмический и аппаратный методы устранения погрешности дефокусировки. Описанные в работе метод и методика позволяют в реальном времени осуществлять прямое измерение фрактальной, в том числе хаусдорфовской размерности изображения многомерного объекта с относительной погрешностью порядка $2,5…3,0 \cdot 10^{-2}$.

Основной задачей, решаемой оптическими и телевизионными автоматическими и измерительными системами и предваряющей выполнение функций измерения параметров, контроля положения объекта, слежения и управления объектом, является обнаружение факта появления объекта в пространстве наблюдения системы. Классическая процедура обнаружения объекта системой сводится [1, 2] к сканированию элементов пространства по выбранному в системе алгоритму, выделению полученной смеси сигнала и помех и последующей ее фильтрации. Решение о наличии искомого объекта принимается при превышении получаемого сигнала порогового уровня, устанавливаемого в соответствии с принятым критерием обнаружения. Чаще всего задача обнаружения решается в условиях априорной неопределенности при неизвестных моделях сигналов и помех.

Интенсивно изучаемым в последнее время, альтернативным классическому подходом решения задач обнаружения является попытка использования методов фрактальной геометрии. Согласно определению Мандельброта [3], под фракталом понимается структура, состоящая из частей, в каком-то смысле подобных целому. Принцип самоподобия подчеркивает основной отличительный признак теории фрактальной геометрии: фрактал должен выглядеть одинаково в любых представляемых масштабах. В основе понятий фрактальной меры и фрактальной размерности, характеризующих фрактальные множества [3–5], лежат положения геометрической теории меры, теории размерности и общее понятие фрактальной размерности, данное Хаусдорфом [6]. Определения фрактальной меры и размерности Хаусдорфа основываются на математической абстракции практического способа элементарной геометрии измерения длин, площадей и объемов путем покрытия измеряемого объекта определенной мерой ε, являющейся для данного метода эталоном. Если пространство поля наблюдения системой является компактом, то его размерность по методу покрытия эталонами меры определяется размерностью оцениваемой количеством эталонов мер, сосредоточенных в компакте. При определении размерности компакта используют топологические понятия, физически связанные с метрическими свойствами и размерностью компакта [7]. Топология, в сущности, состоит в изучении связной структуры пространств.

Если X – произвольное метрическое пространство, то хаусдорфовой размерностью n(x) пространства X называется [6] верхняя грань множества всех действительных чисел p, для которых $m_p(X)$ является p-мерной в $\mu_*(\Xi) = \sup \mu_\varepsilon(\Xi) > 0, \quad \varepsilon = \dim \Xi, \qquad \varepsilon > 0.$

Хаусдорфова размерность пространства не обязательно является целым числом. Причем любые пространства поля наблюдений, гомеоморфные данному пространству X, имеют нижнюю грань хаусдорфовой размерности этих пространств, равную размерности пространства X. Согласно [3] множество пространства X называется фрактальным, если его размерность Хаусдорфа n(x) не является целым числом. Исходя из логики метода покрытия, n(x) отражает рост числа множеств диаметра ε, необходимых и достаточных для покрытия множества пространства X, когда $\varepsilon \to 0$. То есть, если $\Xi \subset R^{\mu}$, то n(ε) – есть число m-мерных тел размером ε, покрывающих X, которое растет при $\varepsilon \to 0$ по зависимости $N(\varepsilon) \sim 1/\varepsilon^{X}$, и тогда считают, что множество пространства X имеет размерность Хаусдорфа, равную D.

В случае простого счетного декартового множества пространства наблюдения, называемого канторовским, хаусдорфова размерность определяется соотношением логарифмов log2/log3 = 0,63093.

Установление факта обнаружения объекта при его появлении в пространстве наблюдения основывается на изменении фрактальной размерности пространства наблюдений относительно значения фрактальной размерности пространства при отсутствии в нем объекта, которая обычно априори неизвестна или недоступна для измерения. Часто [3] размерность пространства вычисляется методом вариации масштабирования изображения. Этот подход основан на том, что с уменьшением масштаба площадь фрактального объекта уменьшается, а геометрического объекта – в идеальном случае постоянна. На практике же при измерении в различных масштабах она сходится к некоторому предельному значению. Тогда важно знать степень влияния масштабирования, осуществляемого изменением фокусного расстояния приемной оптики, на закономерность изменения оценки фрактальной размерности оптически наблюдаемых реальных структур и объектов. Знание закономерностей изменения фрактальной размерности позволит сформулировать более точные критерии обнаружения объектов в условиях изменения структуры пространства. Поэтому определение размерности фрактального изображения,

например, частицы связнодисперсной структуры как объекта обнаружения по методу покрытия эталонами мер и оценку влияния дефокусировки на фрактальную размерность необходимо проводить с учетом предварительного знания о размерах и геометрии этого же объекта. Измеренная фрактальная размерность, с удовлетворительной точностью отражающая структуру (пористость, шероховатость и т.д.) поверхности объекта, может быть использована для его обнаружения и распознавания в условиях изменения структуры пространства наблюдения. Физически ясно, что размер фрактала изображения в какой-то степени подвержен влиянию геометрии объекта и параметров приемной оптики, таких как, разрешающая способность, распределение прозрачности, относительное расположение плоскости изображения и фоточувствительной плоскости приемника изображения (ПИ), аберрационных и многих других факторов.

В настоящей работе устанавливается функциональная взаимосвязь между фрактальной размерностью, связанной с формой и очертаниями объекта, и деградацией (размытием и дефокусировкой) пространства изображения в выходной области оптической системы, обычно совмещаемой с чувствительной поверхностью ПИ системы поиска, обнаружения и распознавания объекта. На основе экспериментальных измерений предложен метод количественной оценки влияния размытия и дефокусировки в плоскости изображения, позволяющий устранить влияние погрешности, обусловленной неточностью фокусировки и другими факторами, связанными с особенностями размещения ПИ системы поиска и распознавания, на фрактальную размерность изображения объекта. Эта важная характеристика проясняет взаимозависимость между фокальным изображением и фрактальной размерностью изображения объекта и позволяет разработать метод устранения влияния на количественную характеристику фрактальной размерности погрешности, обусловленной неточностью фокусировки и другими факторами, связанными с размещением ПИ.

Фрактальная размерность, показывающая по форме и очертаниям контуров объектов на их принадлежность к определенному классу, может быть весьма эффективно измерена по картине искажений изображения элементарного, в том числе, шероховатого объекта или структурной полидисперсной частицы. Основная причина того, что фрактальная размерность объектов в исследованиях не стала еще чем-то обычным, является то, что нет полной ясности в надежности и правильности высокоточного определения фрактальной размерности как основы классификации обнаруживаемых системами объектов. Для повышения точности установления взаимосвязи аутентичности между классом изображений объектов и размерностями фрактала необходимо уделить внимание следующему. Во-первых, исследовать системные аспекты, влияющие на четкость изображения, в том числе, взаимное смещение плоскостей фокальной и изображения. Многоэлементные ПИ позволяют проводить измерения фрактальной размерности объектов пространства наблюдений методом покрытия эталонами мер, являющегося основой мерных методов фрактальной геометрии. Один из алгоритмов реализации динамического метода вариационного покрытия канторова множества пространства наблюдения был описан ранее [8] для систем поиска, обнаружения, слежения и наведения оптически наблюдаемых в пространстве объектов. Во-вторых, заслуживают особого исследования факторы, которые оказывают значительное влияние на достижение наиболее высокой точности определения размерности фрактала. Несомненно, это влияние условий фокусировки изображения на размер фрактала. Принимая во внимание функциональную взаимосвязь фокальных характеристик изображения, в работе предложен метод снижения влияния погрешностей фокусировки на оценку фрактальной размерности оптически наблюдаемого объекта.

При решении задач обнаружения объекта учитывается, что практически любой из его параметров имеет некоторую случайную составляющую. То есть, фактор априорной неопределенности. В нашем случае изменяющимся параметром может считаться площадь, покрываемая нефрактальным объектом. Поэтому, изучение степени влияния масштабирования изображения путем изменения условий его фокусировки на оценку фрактальной размерности изображения объекта, проецируемого на матричный ПИ, представляет практический интерес. При определении размерности фрактальных изображений с использованием вейвлет-преобразования полезна реализация алгоритмов, основанных на связи фрактальных со спектральными характеристиками изображений. Операция масштабирования является также основной составляющей технологии вейвлет.

Используя метод покрытия эталонами мер, размерность фрактала изображения определим следующим образом. Примем поле изображения пространства наблюдения d-мерным пространством, содержащим некоторое множество изображений объектов. Для покрытия этого множества необходимо некоторое достаточно большое число N(ε)-мерных внешних эталонных мер размером ε, определяемым в процессе масштабирования (скейлинг-обработки) соотнош... ия при $\varepsilon \to 0$:

$$N(\varepsilon) \sim \delta^{-\Delta}.$$

Основываясь на тождественности собственных аффинных преобразований геометрических характеристик простейших изображений об... осуществляемых в процессе масштабирования $\delta \to \varepsilon$, взаимосвязь между N(ε) и d описывается линейным соотношением вида:

$$\log N(\varepsilon) = -\Delta \log \delta + \mathrm{const}.$$

Отсюда, следуя Хаусдорфу [6], показатель степени D, определяющий крутизну изменений размерности множества и называемый хаусдорфовой размерностью, соответствует размеру фрактала изображения:

$$\Delta = \lim[\log N(\varepsilon)/\log(1/\varepsilon)], \text{ при } \varepsilon \to 0.$$

Об... $\log N(\varepsilon) = N_i$ и $\log \delta = \log(1/\varepsilon)] = \delta_i$,

где i – число элем...

$$N_i = -\Delta\, \delta_i + \mathrm{const}. \quad (1)$$

Как видно из этого линейного соотношения, число квадратов покрытия N_i связано с величиной стороны d линейной зависимостью и отражает размерность фрактала. Оценка размера фрактала изображения в

предположении линейной регрессионной связи по методу наименьших квадратов запишется в виде:

$$€ = \left[{}^{\nu} \left(\sum \delta N\right) - \left(\sum \delta\right)\left(\sum N\right) \right] / \left[{}^{\nu} \left(\sum \delta^{2}\right) - \left(\sum \delta\right)^{2} \right],$$

$$\text{для} \; = (1 - {}^{\nu}),$$

$$\sigma_{\Delta}^{2} = {}^{\nu}\sigma^{2} / \left[{}^{\nu} \left(\sum \delta^{2}\right) - \left(\sum \delta\right)^{2} \right], \quad (2)$$

с дисперсией где σ^2 – дисперсия ошибки исходных данных, равнозначная для всех. Широко известно, что оценка, полученная по методу наименьших квадратов, даже в случае отклонения от нормального распределения, является несмещенной, и в некотором смысле, наилучшей, а ее дисперсия будет меньше, чем дисперсия любой другой линейной оценки. Здесь σ_N^2 – дисперсия данных с одного и того же элемента и для каждого i при линейной регрессии. Используемая форма линейной модели регрессии является общей, так как к ней сводятся модели более высоких порядков и некоторые нелинейные относительно описываемых параметров модели.

Форма фрактального изображения, так же как форма любого вида сигналов, является одним из отличительных признаков распознавания принадлежности фрактального множества к искомому классу объектов в радио-, гидро-, акустолокационных и оптических системах. Амплитудно-временные вариации масштаба, наличие дефокусировки и размытие изображений и ряд других факторов, в том числе, наличие аддитивных и мультипликативных погрешностей в процессе передачи и преобразования изображений снижают точность оценки меры близости исходного и наблюдаемого изображений. Это затрудняет распознавание и классификацию изображений по форме. Дефокусировка и размытие изображения вследствие неточности масштабирования являются искажающими факторами. Можно ожидать, что эти факторы в определенной степени вносят вклад в погрешность оценки фрактальной размерности как функционально зависимое воздействие на оптическое изображение через "скейлинг" (scaling function) – масштабирующую функцию – одну из основных составляющих технологии вейвлет и оценки фрактальной размерности сигналов и изображений.

Понимая, что, в зависимости от типа систем и класса пространств изображений, фактор дефокусировки и размытия изображения по-разному влияет на степень искажений изображения, проанализируем основу влияния этих физических явлений на фрактальную размерность изображения – важную характеристику для формирования робастных свойств оптических и телевизионных систем поиска и слежения. При проецировании (рис. 1) трехмерного пространства наблюдения (сцены, фоноцелевой обстановки) на фоточувствительную поверхность ПИ, размещенного в плоскости изображения, сфокусированной будет только часть наблюдаемого пространства. Величина дефокусировки в значительной степени зависит от эффективного размера $2R_0$ и фокусного расстояния f_0 оптической апертуры, точности совмещения плоскости изображения и фотоприемника, а также удаления объектов наблюдения в пространстве.

Если плоскость ПИ расположена в задней фокальной плоскости приемной оптики, то наиболее резко изображаются бесконечно удаленные "точечные" объекты. При перемещении ПИ относительно оптической апертуры изменяются условия оптимальной фокусировки при формировании изображений объектов, расположенных в пространстве на различном удалении от приемной оптики. То есть, глубина резкости в точке фокуса является функцией удаления объекта. Рис. 1 наглядно иллюстрирует особенности этого процесса: более удаленные объекты или их фрагменты фокусируются перед плоскостью изображения; наиболее близкие – за плоскостью изображения.

При практической реализации поле изображения ансамбля объектов и наблюдаемого пространства, проецируемое оптической системой на фоточувствительную поверхность ПИ на приборе с зарядовой связью (ПЗС) цифровой фотокамеры (ти-па Nikon Coolpix 5700 или Canon S45/G2, Olympus E-20P), вводится в персональный компьютер в формате стандартных файлов ISO, JPEG или TIFF. Формат получаемого полутонового цифрового поля изображения ~2000×2000 элементов. Погрешность квантования по амплитуде сигнала определяется характеристикой используемого стандарта ISO, JPEG, TIFF или RAW (фирменный формат NEF) 0,02 %. В соответствии с действием правила смежности (n–2) канторова и хаусдорфова пространств при определении размерности методом покрытия, рекомендуемый тип формы поля изображения – квадратный. Размер одиночного квадрата, определяемый его шириной d и оцениваемый 16 уровнями квантования, может изменяться в пределах 1/25–1/500 масштаба полного формата поля изображения. Сторона d делится квадратами на 100 и составляет примерно 4–5 элементов.

Обычно круглой формы оптическая апертура радиусом R_0 имеет гауссово распределение прозрачности, и изображение удаленного, практически неразрешаемого, объекта имеет вид эллипсоида, называемого кружком рассеяния. Размер кружка рассеяния, как и фрактала изображения части наблюдаемого пространства, зависит от расстояния L до наблюдаемого в пространстве объекта. Считая, что плоскости расположения ближнего (индекс "Б") и дальнего (индекс "Д") объектов и плоскость ПИ расположены параллельно плоскости оптической

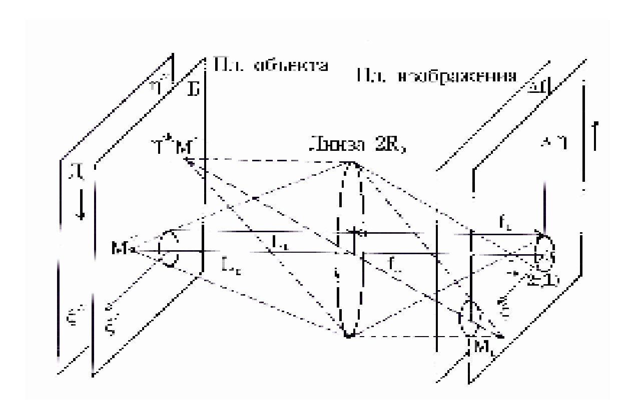


Рис. 1. Модель формирования изображения

апертуры, справедливо соотношение

$$\Lambda_{\otimes}^{-1} + \phi_{\otimes}^{-1} = \phi_{0}^{-1} = \Lambda_{з}^{-1} + \phi_{з}^{-1}.$$

Масштаб $\gamma_{\otimes} = \Lambda_{\otimes} / \phi_{\otimes}$ едущий определится отношениями: и $\gamma_{з} = \Lambda_{з} / \phi_{з}$. Введем декартовую систему координат: $\xi' O\ \eta'(\xi'' O\ \eta'')$ – для объектной плоскости и $\xi\ O\ \eta$ – для плоскости ПИ. Тогда интенсивности излучения представится в виде $'(\xi';\eta')$ и $''(\xi'';\eta'')$ – для объектов $M'(\xi';\eta')$ и $M''(\xi'';\eta'')$, находящихся на различном удалении от приемной оптики. Для одного из изображений в плоскости ПИ получим:

$$(\xi;\eta) = T'(\xi';\eta'); \quad \xi = -\xi'/\gamma; \quad \eta = -\eta'/\gamma.$$

Диаметр кружка рассеяния $2\rho_0$, например, несфокусированного изображения объекта, определится соотношениями, получаемыми из геометрии (рис. 1):

$$2\rho_0(\Lambda) = \pm[2P_0 / \Lambda_з(\Lambda_{\otimes} - \phi_0)] \times$$
$$\times [\Lambda_з(\Lambda_{\otimes} - \phi_0) - \Lambda_{\otimes}\Lambda_з + \phi_0\Lambda_{\otimes}],$$

для $\Lambda_{\otimes} \le \Lambda_з \le \infty$ – знак "–", а для $\phi_0 \le \Lambda_з \le \Lambda_{\otimes}$ – знак "+". Отсюда видно, что для однородного полутонового изображения величина области фокусировки может быть точно определена, и некоторая степень дефокусировки не будет влиять на фокальную область. Следовательно, влияние дефокусировки необходимо измерять в плоскости изображения. При значительном контрасте, когда фон и изображение объекта ясно различимы, из-за отклонения положения фокальной плоскости от действительного происходит расплывание изображения и сглаживание контура. В точке оптимальной фокусировки ярче изображение и выше его резкость. Значит, согласно уравнений (1) и (2), там наибольшая хаусдорфова размерность фрактала. Следовательно, при приближении к плоскости оптимальной фокусировки фрактальная размерность постепенно возрастает до максимального значения, затем уменьшается при выходе за плоскость оптимальной фокусировки. Нахождение точки оптимальной резкости, обеспечивающей наилучшее качество изображения, является оптимизационной задачей. Для точной оценки оптимального положения ПИ необходимо иметь функцию изменения качества от его положения или ее аппроксимацию. Наличие значительного числа аберрационных факторов, оказывающих влияние на поведение функции размытия изображения, позволяет использовать различные аппроксимации: полиномиальную, тригонометрическую и т.п.

Оценку влияния погрешностей фокусировки на фрактальную размерность изображения в системе ПИ на основе ПЗС проведем с использованием часто применяемой на практике квадратичной интерполяции поведения функции в области экстремума. Аппроксимируем зависимость фрактальной размерности D от изменения условий фокусировки изображения вдоль продольной оси Z по полученным значениям в точках a, b и с квадратичной функцией $\Delta(\phi) = A\phi^2 + B\phi + X$,

где D – размерность фрактала; f – фокусное расстояние. Значения неизвестных коэффициентов A, B, и C найдутся из уравнений

$$A\alpha^2 + B\alpha + X = \Delta_{\alpha},$$
$$A\beta^2 + B\beta + X = \Delta_{\beta},$$
$$A\chi^2 + B\chi + X = \Delta_{\chi},$$

которые, после подстановки

$$\pi = (\alpha - \beta)(\beta - \chi)(\chi - \alpha)$$

и преобразований, приобретают вид

$$A = [(\chi - \beta)\Delta_{\alpha} + (\alpha - \chi)\Delta_{\beta} + (\beta - \alpha)\Delta_{\chi}]/\pi,$$
$$B = [(\beta^2 - \chi^2)\Delta_{\alpha} + (\chi^2 - \alpha^2)\Delta_{\beta} + (\alpha^2 - \beta^2)\Delta_{\chi}]/\pi,$$
$$X = [\beta\chi(\chi - \beta)\Delta_{\alpha} + \chi\alpha(\alpha - \chi)\Delta_{\beta} + \alpha\beta(\beta - \alpha)\Delta_{\chi}]/\pi.$$

Очевидно, что функция D(f) имеет решение, определяющее экстремум уравнения квадратичной аппроксимирующей фрактальной размерности в точке $\Delta'(\phi) = -B/2A$. При $\Delta = \Delta_0 + \Delta^{\Delta}$ (где $\Delta_0 \equiv 1$), получим: $\Delta^{\Delta}_{max}(\phi) = -B^2/(4A \cdot X)$. Для квадратичной функции с положительным дискриминантом $B^2 - 4AX > 0$ корни решения определяются теоремой Виета: $x_1 + x_2 = /$ и $x_1 x_2 = /$. По методу разложения на одночлены определим максимум функции D:

$$\Delta^{\Delta}_{max}(\phi_{опт}) =$$
$$= 0{,}5\frac{[((\beta^2 - \chi^2)\Delta_{\alpha} + (\chi^2 - \alpha^2)\Delta_{\beta} + (\alpha^2 - \beta^2)\Delta_{\chi}]}{[(\beta - \chi)\Delta_{\alpha} + (\chi - \alpha)\Delta_{\beta} + (\alpha - \beta)\Delta_{\chi}]}.$$

$|A, B, X|^T$ неизвестных величин коэффициентов можно [9] представить в матричном виде, присвоив i-ым значениям фокуса и фрактальной размерности соответствующие обозначения f_i и D_i:

$$\left[A, B, X\right]^T = (\Phi^T\Gamma\Phi)\Phi^T\Gamma\Delta = \Phi\Phi^T\Gamma\Delta,$$

где

$$\Phi = \begin{vmatrix} \phi_1^2 & \phi_1 & 1 \\ \phi_2^2 & \phi_2 & 1 \\ . & . & . \\ \phi_k^2 & \phi_k & 1 \end{vmatrix}, \quad \Gamma = \begin{vmatrix} \sigma_1^2 & & \\ & \sigma_2^2 & \\ & & . \\ & & & \sigma_k^2 \end{vmatrix}, \quad \Delta = \begin{vmatrix} A_1 \\ A_2 \\ . \\ A_k \end{vmatrix}$$

и $\Phi = (\Phi^T\Gamma\Phi)$.

Тогда оценка максимального значения фрактальной размерности A_{max} примет вид:

$$A_{max} = -B^2/4A \cdot X$$

с дисперсией $\sigma^2_{\Delta} = M^T \Phi M$,

$$M^T = [-B^2/(4A^2), \quad -B/(2A)].$$

Характерная зависимость, отражающая особенности изменения фрактальной размерности изображения объекта при продольном сдвиге положения фокуса, приведена на рис. 2.

Для исследования особенностей влияния на фрактальную размерность явлений дефокусировки и размытия изображения (из-за неточности установки ПИ в плоскости изображения или несоответствия ее расположения закономерности удаления реального объекта или наблюдения пространственно разнесенных по дальности объектов и т.п.) используем дифференциальный

принцип контроля положения плоскости оптимальной фокусировки, разработанный ранее для адаптивных управляемых оптических систем [10]. Критерием фокусировки изображения, согласно этого принципа, в эксперименте является обеспечение минимума разности максимумов функционалов интенсивности сравнивае-

$$\vartheta_{\Delta\ell} = \iint \left\{ M_1(\rho)\left|A_1(\rho)\right|^2 - M_2(\rho)\left|A_2(\rho)\right|^2 \right\} d^2\rho \to \min$$

при минимуме эффективной ширины плотности распределения интенсивности (максимуме функционала резкости-четкости) изображения

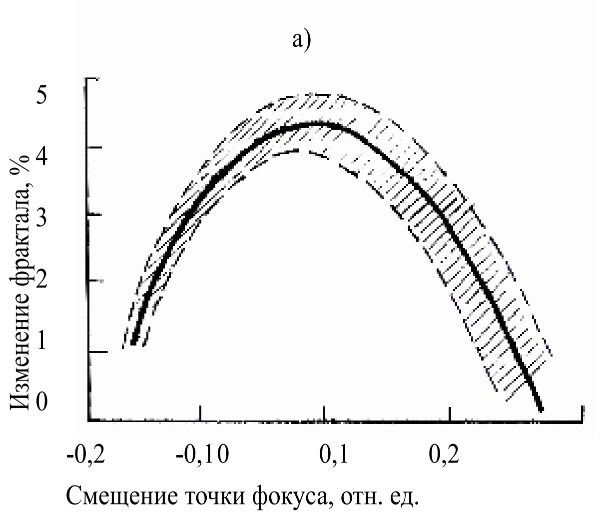
$$\vartheta_{i\delta} = \iint \left\{ \left|(\rho)\right|^2 \left|A_i(\rho)\right|^2 \right\} d^2\rho \to \min,$$

где $M_i(\rho)$ – функция прозрачности диафрагм вырезающих i-ый фрагмент изображения; $A(\rho)$ – мощность оптического излучения, попадающего в $M_i(\rho)$ апертуру объектива; $\rho = \{\xi, \psi\}$ – координата. Интегрирование ведется по всей плоскости изображения или выбранных фрагментов изображения.

Сущность использованного способа определения рассогласования положения ПИ относительно плоскости оптимальной фокусировки заключается в дифференциальной оценке величины размытия изображения, основанной на разности амплитуд сигналов, пропорциональных яркости или освещенности опорных изображений объектов или их фрагментов, разнесенных [10] на некоторое расстояние $\Delta\ell_п$ в пространстве плоскости изображения или объектной при минимальной ширине сигнала изображения. Тогда положение плоскости оптимальной фокусировки определяется как средняя точка между положениями выбранных опорных фрагментов изображения, находящихся на равных расстояниях относительно определяемого положения поверхности оптимальной фокусировки. Наибольшая четкость одного из опорных фрагментов изображения находится перед плоскостью оптимальной фокусировки, другого – за плоскостью.

При сдвиге ПИ вдоль продольной оси система формирует дифференциальный сигнал дефокусировки, пропорциональный сдвигу приемника относительно оптимального положения. Знак дифференциального сигнала отражает направление сдвига приемника (ближе или дальше плоскости оптимальной фокусировки); амплитуда – абсолютную величину смещения ПИ от положения области оптимальной фокусировки. Порог регистрируемых энергетических экспозиций для отечественных ПИ на ПЗС составляет (2…8)·10^{-9} Дж/см^2. Это обеспечивает соотношение сигнал/шум ~10…100. Приведенные на рис. 2 результаты математического и имитационного моделирования расчетной погрешности измерения размерности фрактала изображения хорошо (в пределах методической погрешности) согласуются с результатами эксперимента. Экспериментально установлено (рис. 2, б), что обусловленная расфокусировкой изображения погрешность измерения фрактальной размерности односвязного изображения, являющегося компактом для класса удаленных объектов, не превышает сотых долей линейного размера элемента ПИ на ПЗС, размерность которого является топологическим эталоном меры. Из анализа данных (рис. 2, а) замечено некоторое увеличение дисперсии оценки фрактальной размерности для фрагментов более удаленных объектов или их элементов, то есть, при перемещении переднего фокуса в глубину наблюдаемого множества. При переходе к логарифмическому масштабу для кривой (рис. 2, б) в диапазоне отношения сигнал/шум от 0 до 8 наблюдается линейная зависимость, свыше 8 переходит в нелинейную обратно пропорциональную зависимость. Это обусловлено тем, что в первом случае фрактальное изображение является малоконтрастным, а во втором случае начинает оказывать влияние нестационарность шума, то есть, зависимость шума от величины сигнала фрактального изображения.

Итак, в настоящей работе исследована зависимость фрактальной размерности от условий фокусировки по полю изображения. Использование дифференциального способа контроля положения плоскости оптимальной фокусировки позволило исключить влияние непостоянства освещенности изображения на оценку фрактальной размерности. Обнаружена квадратичная



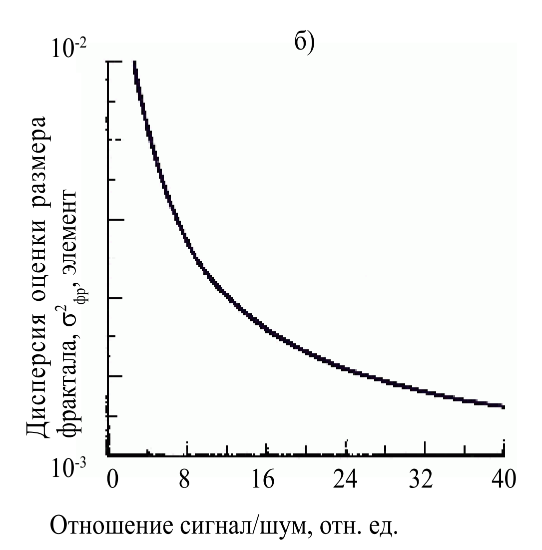


Рис. 2. Влияние дефокусировки на размерность фрактала (а) и погрешность ее оценки в долях элемента ПИ в зависимости от отношения сигнал/шум (б)

зависимость фрактальной размерности от изменения фокусного расстояния приемной оптики. Предложены алгоритмический и аппаратный методы устранения погрешности дефокусировки. Аппроксимация квадратичным полиномом зависимости D(f) и определение его максимума позволяет с погрешностью $\sim 10^{-1}\ldots 10^{-2}$ размера элемента получить фрактальную размерность изображения наблюдаемого в пространстве объекта. Учет этих факторов позволит с вероятностью 0,95 обнаруживать появление объекта по изменению фрактальной размерности пространства наблюдения при изменяющейся фоноцелевой обстановки в условиях априорной неопределенности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пустынский И.Н., Слободян С.М. Диссекторные следящие системы. – М.: Радио и связь, 1984. – 136 с.
2. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. – Т. 2. – М.: Мир, 1982. – 600 с.
3. Федер Е. Фракталы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
4. Федерер Г. Геометрическая теория меры: Пер. с англ. / Под ред. А.Г. Витушкина. – М.: Наука, 1987. – 760 с.
5. Люмис Л. Введение в абстрактный гармонический анализ. – М.: Иностранная литература, 1956. – 251 с.
6. Hausdorff F. Dimension und ausseres Mass // Annals of Mathematic. – 1919. – B. 79. – S. 157–179.
7. Поллен К. Топологические и матричные методы: Пер. с англ. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 96 с.
8. А.с. 1429912 СССР. МКИ G01S 13/72. Устройство управления рабочим полем прибора с зарядовой связью / С.М. Слободян, А.Р. Яковлев. Заявлено 02.04.1985. Опубл. 08.06.1988. Бюл. № 37. – 10 с.: ил.
9. Satou T., Nomura Y. Fractal dimension of particle geometry as a surface roughness scale relationship to the inter-particle friction // J. Soc. Powder Technol. Japan. – 1999. – V. 36. – №. 3. – P. 174–178.
10. Арутюнов В.А. Слободян С.М. Исследование ПЗС-датчика волнового фронта адаптивно-оптической системы фокусировки излучения // Приборы и техника эксперимента. – 1985. – № 1. – С. 160–162.